ChinaXiv合作期刊

第 29 卷　第 12 期　　材　料　研　究　学　报　　Vol. 29 No. 12
2015 年 12 月　　CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH　　December 2015

等腰梯形蜂窝玻璃钢夹芯板的侧压性能

郑吉良　孙　勇　彭明军

(昆明理工大学材料科学与工程学院　昆明 650093)

摘 要 使用材料试验机对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板面的内压缩性能进行了实验测试与模拟研究。结果表明, 夹芯板面内压缩的破坏方式主要有面板折断、夹芯板屈曲失稳及面板和蜂窝脱粘。面板是夹芯板面内压缩的主要承载构件, 蜂窝芯对面板起固支作用。面板的结构参数和材料参数是影响夹芯板面内压缩抗压强度与承载应力的主要因素, 蜂窝芯的结构参数和材料参数对夹芯板面内压缩抗压强度的影响较小, 而蜂窝芯的高度对夹芯板面内压缩承载应力有显著的影响。

关键词 无机非金属材料, 等腰梯形蜂窝芯, 抗压强度, 承载应力, 夹芯板, 面内压缩

分类号 TB303　　文章编号 1005-3093(2015)12-0931-10

Edgewise Compressive Property for Sandwich Panel of Steel Plates with Isosceles-trapezoid Honeycomb Core of Fiber Cloth Reinforced Epoxy Resin

ZHENG Jiliang*　SUN Yong　PENG Mingjun

(School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Manuscript received March 5, 2015; in revised form August 7, 2015.

*To whom correspondence should be addressed, Tel: 15288259470, E-mail: 271226703@qq.com

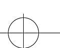
ABSTRACT The edgewise compressive property of sandwich panel of steel plates with isosceles-trapezoid honeycomb core of fiber cloth reinforced epoxy resin is measured by using a material testing machine, while a simulation mode is established to describe the edgewise compressive behavior. The edgewise compressive pressure may induce three types of damages of the sandwich panel, namely, the broken of plates, the buckling instability of the sandwich panel and the detachment of plates with the honeycomb core. Under an applied edgewise compressive pressure, the plates are the main load bearing component of the sandwich panel, while the honeycomb core acts only as a connector and supporter . The parameter related with the structure and the material of the plates has a great influence on the in-panel compressive strength and the bearing stress for the sandwich panel. In the contrast, parameter related with the structure and the material of the honeycomb core has a small influence on the compressive strength of the sandwich panel, but the height of honeycomb core has a great influence on the bearing stress of the sandwich panel.

KEY WORDS inorganic non-metallic materials, isosceles-trapezoid honeycomb core, compressive strength, load stress, sandwich panel, in-plane compression

蜂窝芯夹芯板由上、下蒙皮和周期性多孔蜂窝芯夹层构成, 具有高比刚(强)度、隔热与减振等优异性能, 广泛应用于航空与航天等领域[1-4]。孙直等[5]研究了芳纶纤维增韧夹芯梁面内压缩性能影响; Wang 等[6]和 Sun 等[7, 8]建立了具有短纤维增韧复合材料夹芯梁面内压缩界面破坏的数值分析模型; 闫光等[9]对完整复合材料圆柱壳轴向压缩性能进行了实验与模拟研究; 杨颜志等[10]设计了复合材料格栅圆柱筒的全尺寸轴压破坏实验, 并提出了模拟复合材料圆柱筒的全尺寸轴压破坏过程全壳体有限元法。井玉安等[11]对普碳钢蜂窝夹芯板进行了面内压缩实验, 用贴片法测量了试件的等效弹性模量、泊松比与抗压强度; Karagiozova 等[12]研究了六边形金属蜂窝芯夹芯板双轴向面内压缩工况下夹芯板的塑性变形方式; Wang 等[13]研究了金属夹芯板面内压缩抗压刚度与强度; 田爱平等[14]研究了泡沫铝-空心玻璃微珠复合材料面内压缩工况下, 试件弹性模量、屈服极限、比强度及比刚度力学性能与 HGM 体积分数的关系。Lin 等[15]对圆管蜂窝芯面内弹性模量、泊松比

2015年3月5日收到初稿; 2015年8月7日收到修改稿。
本文联系人: 郑吉良

chinaXiv:202303.00214v1



ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.00214v1

与塑性屈服强度进行了理论分析。Tantikom[16]等通过实验测试与数值计算分析发现, 蜂窝芯体胞尺寸与试件尺寸相当时, 实验测试结果依赖于蜂窝芯体胞尺寸, 揭示了尺寸效应的存在及其影响; Zhang[17]等开展了考虑尺寸效应影响的二维夹芯结构刚度优化设计。

但是在上述研究中, 蜂窝芯夹芯板中夹芯的形状主要有正六边形、正方向、圆形及三角形等, 对 π 类蜂窝芯的研究很少。本文用真空保压压力成型方法制作 π 类的等腰梯形玻璃钢蜂窝芯, 得到的蜂窝芯为整体结构, 省略传统蜂窝芯粘结步骤以避免个别蜂窝芯胞壁之间漏粘结的缺陷。同时, 在侧压实验基础上建立等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板侧压有限元模型, 分析破坏机制并研究试件结构参数及本体材料参数对夹芯板侧压力学性能的影响。

1 实验方法

按照GB/T 1454-2013《夹层结构侧压性能试验方法》的规定设计试件。在夹芯板的长度方向包含9个蜂窝芯格子, 在宽度方向包含6个蜂窝芯格子。

纤维布为双层单轴向排布, 纤维布的长度为1160 mm, 宽度为900 mm, 环氧树脂的用量为775 g, 酸酐固化剂的用量为230 g, 曼尼希碱的用量为60 g。

用真空灌注方法对双层单轴向纤维布进行注胶, 并在真空保压状态下80℃恒温固化8 h, 制备出单向玻璃纤维含量约70%的玻璃钢面板样品。将上述双层单轴向纤维布平铺在下模具上表面, 应用上述胶配比量对纤维布进行刷胶。将上模具与下模具缓慢合模, 在真空条件下保压1 h后在真空保压状态下80℃恒温固化8 h, 得到等腰梯形玻璃钢蜂窝芯。用胶黏剂将蜂窝芯与面板粘结成夹芯板结构。

用型号为MTS810-100KN的万能材料试验机进行侧压试验, 得到试件的应力-位移曲线。试件破坏形式分为三种: 面板折断、夹芯板屈曲失稳与面板与蜂窝芯脱粘。

2 有限元模拟

2.1 有限元模型的建立

本文主要研究夹芯板中面板折断与夹芯板屈曲失稳两种破坏工况。根据侧压试件尺寸要求, 使用有限元软件ANSYS结构静力分析模块和屈曲分析模块建立等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板沿着图1a中x轴方向侧压有限元模型。等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板结构与蜂窝芯单元胞体模型及结构参数,

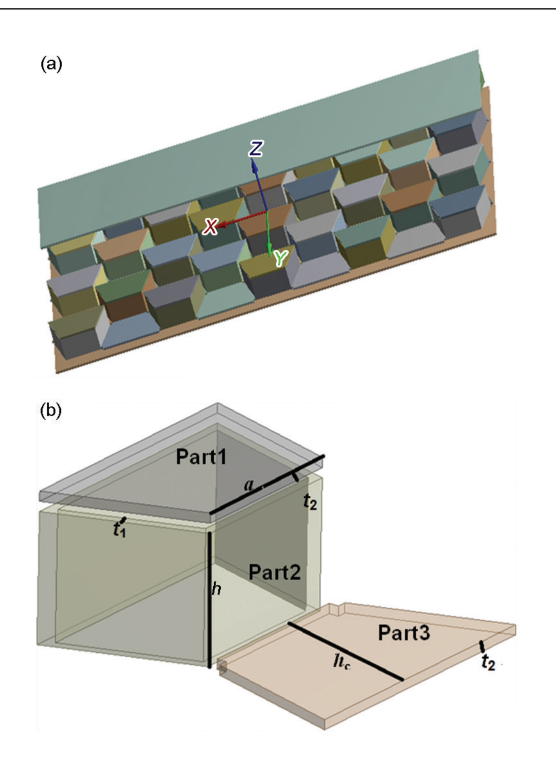


图1 等腰梯形蜂窝玻璃钢夹芯板结构其单元胞体结构参数

Fig.1 Isosceles-trapezoid honeycomb core of glass steel sandwich panel geometry (a) and unit cell body's geometry parameters (b)

如图1所示。

等腰梯形玻璃钢蜂窝芯中单向玻璃纤维排布方向具有差异性, 蜂窝芯中Part1与Part3中单向玻璃纤维排布方向与图1a中的 y 轴方向平行, 蜂窝芯中Part2中单向玻璃纤维排布方向与图1a中的 z 轴方向平行。进行有限元计算时, 给定蜂窝芯中Part1、Part3与Part2本体材料的力学参数不同。因此, 在有限元建模过程中需要把蜂窝芯分成Part1、Part2和Part3三部分。面板中单向玻璃纤维的排布方向, 与图1a中 x 轴的方向平行。给定的面板本体材料的力学参数[18]为: 弹性模量 E_x=63.43 GPa、E_y=E_z=8.73 GPa, 泊松比 ν_{xy}=ν_{xz}=0.263、ν_{yz}=0.086, 剪切模量 G_{xy}=G_{xz}=5.14 GPa、G_{yz}=4.02 GPa; 蜂窝芯中的Part1与Part3本体材料力学参数给定的弹性模量为 E_y=63.43 GPa、E_x=E_y=8.73GPa, 泊松比 ν_{xy}=ν_{yz}=0.263、ν_{xz}=0.086, 剪切模量为 G_{xy}=G_{yz}=5.14 GPa、G_{xz}=4.02 GPa; 蜂窝芯中的Part2本体材料力学参数给定的弹性模量为 E_z=63.43 GPa、E_x=E_y=8.73 GPa, 泊松比为 ν_{xz}=ν_{yz}=0.263、ν_{xy}=0.086, 剪切模量为 G_{xz}=G_{yz}=5.14 GPa, G_{xy}=4.02 GPa。在图1b中 a 为蜂窝芯胞体横截面形状的等腰梯形上底边长, a 为17 mm, h_c 为蜂窝芯胞体横截面形状的等腰梯形高, h_c 为15 mm, h 为蜂窝芯中Part2高, h 为7 mm, t_1 为蜂窝芯中Part1与Part3胞壁厚度, t_1 为1 mm, t_2 为蜂窝

ChinaXiv合作期刊

芯中Part2胞壁厚度, t_2为1 mm, 蜂窝芯胞体横截面形状的等腰梯形下底边长为27 mm。由于试件具有边界对称循环特点, 取图2a中有限元模型进行网格划分及边界条件设置, 有限元模型左与右两侧给定对称循环边界条件。计算侧压夹芯板中面板的折断抗压强度时, 监视面板最大剪切应力理论值(对应《材料力学》第三强度理论), 设定最大剪切应力理论值最高值达到面板本体抗压强度为收敛最后一步, 夹芯板上端加持部位一个蜂窝芯的高度的面板侧面给定法向无摩擦约束, 下端加持部位一个蜂窝芯的高度的面板侧面给定固定约束, 面板上表面给定图1a中 x轴方向位移载荷, 取收敛最后一步位移载荷的支反力除以加载面积得到侧压夹芯板中面板折断的抗压强度; 计算夹芯板屈曲失稳的承载应力时, 夹芯板上端加持部位一个蜂窝芯的高度的面板侧面给定法向无摩擦约束, 下端加持部位一个蜂窝芯的高度的面板侧面给定固定约束, 面板上表面给定图1a中 x轴方向1 MPa压应力外载荷。网格采用六面体占优方法(Hex Dominant Method), 单元与节点数分别为12225与67482。有限元模型、网格与边界条件, 如图2所示。

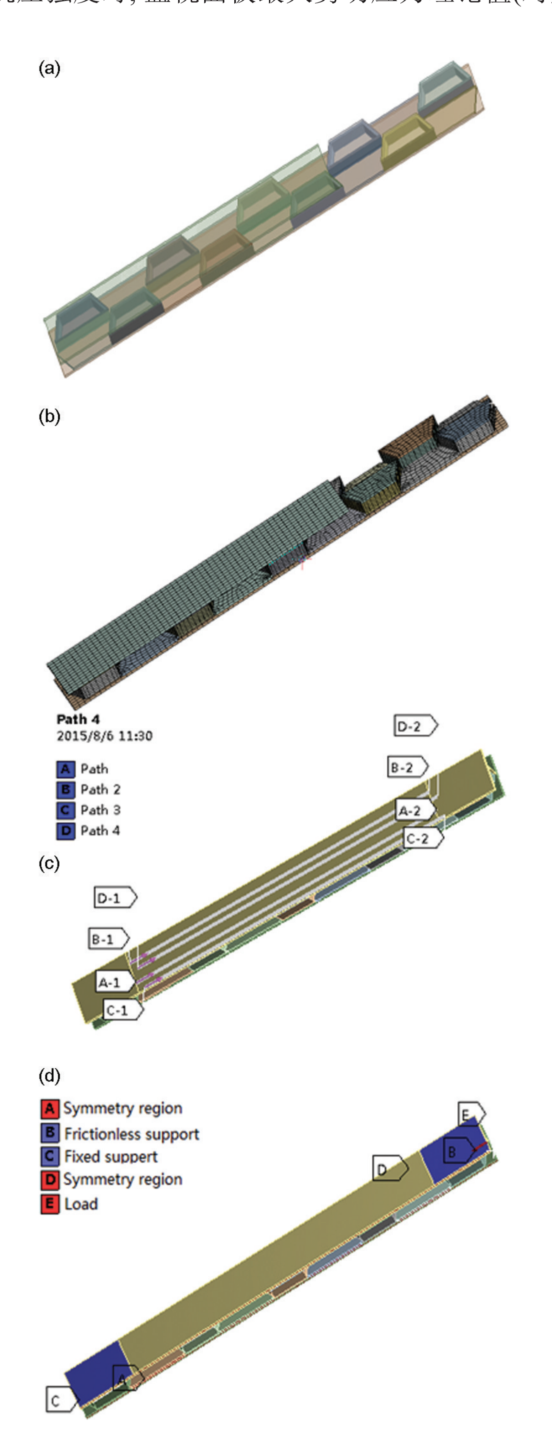


图2 等腰梯形玻璃钢蜂窝芯夹芯板侧压有限元模型、网格、路径及边界条件

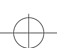
Fig.2 Finite element model (a) and mesh element (b) and boundary conditions (c) and path (d) for isosceles trapezoid- glass steel honeycomb core's sandwich panel under end compressive loading

2.2 夹芯板的破坏过程分析

在ANSYS结构静力分析模块中, 通过改变公式$[K]\{x\}=\{F\}$中刚度矩阵常量$[K]$大小改变面板与蜂窝芯粘结强度。得到等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板不同破坏方式应力与位移云图, 如图3所示。由图3中的云图可见, 随着面板与蜂窝芯界面粘结强度常量$[K]$降低夹芯板主要呈现三种破坏方式: 面板折断、夹芯板屈曲失稳和夹芯板中面板与蜂窝芯脱粘。这三种破坏方式与试验结果类同, 说明了有限元模型的准确性。

选取对应等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板三种失效过程中未破坏阶段, 作为研究对象。图4a给出了蜂窝芯界面中四条路径的图1a中 z轴方向正应力分布曲线; 图4b给出了蜂窝芯界面中四条路径中的最大剪切应力理论值分布曲线; 图4c给出了面板界面中四条路径中最大剪切应力理论值分布曲线。为了便于分析蜂窝芯与面板的界面应力, 蜂窝芯与面板无黏结界面位置给定0值(图4a与b中应力为0位置)。图4a中1a、2a、3a与4a为蜂窝芯界面路径Path1的图1a中 z轴方向正应力集中点, 1a、2a、3a与4a点出现在蜂窝芯与面板黏结界面边缘位置。图4a中蜂窝芯界面路径Path2、Path3与Path4的图1a中 z轴方向正应力集中点与蜂窝芯界面路径Path1中1a、2a、3a与4a应力集中点具有相似性质。图4a中3a、3b、3c与3d分别为蜂窝芯界面路径Path1、Path2、Path3与Path4中 z轴方向正应力集中点。3a与3d、3b与3c分别为对应点, 3a与3b点位置为压应力, 3c与3d点位置为拉应力。图4a中其它对应点的图1a中z轴方向正应力具有相似规律。压应力对蜂窝芯与面板界面粘结起加强作用, 拉应力对蜂窝芯

chinaXiv:202303.00214v1



ChinaXiv合作期刊

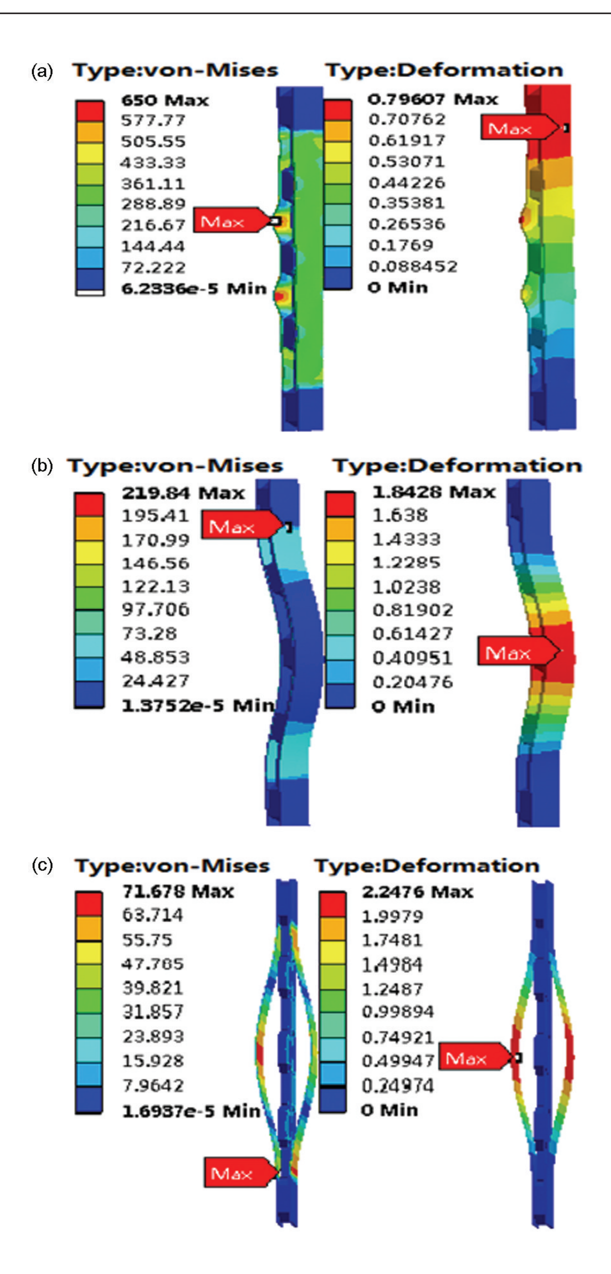
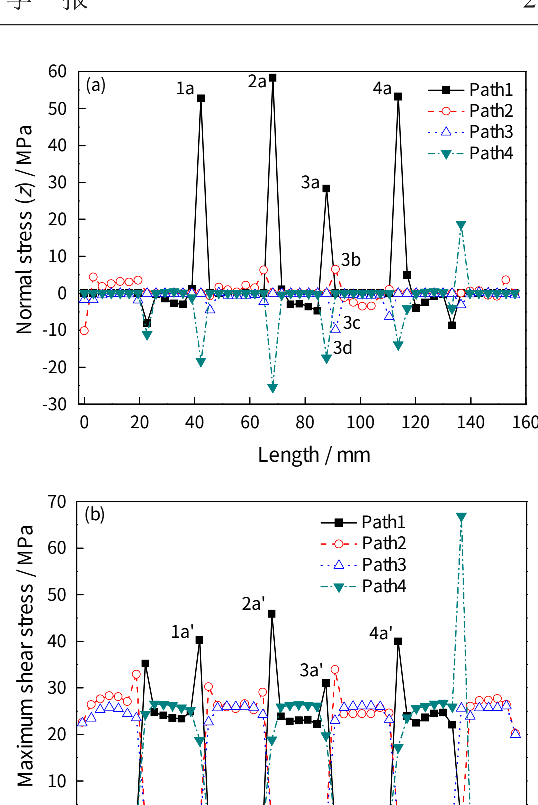


图3 等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板不同破坏方式的应力与位移云图

Fig.3 Different damage way's von-Mises and deformation cloud picture for isosceles- trapezoid honeycomb core of glass steel sandwich panel (a) panel is broken, (b) sandwich panel is instability, (c) panel and honeycomb core is separation



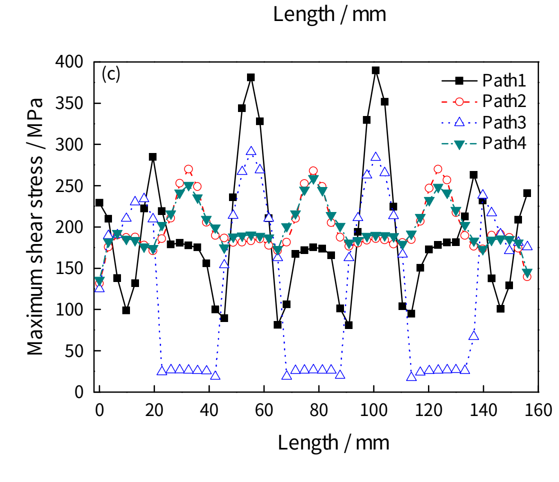


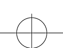
图4 蜂窝芯界面路径的正应力(*z*)、最大剪切应力理论值及面板界面路径的最大剪切应力理论值的分布

Fig.4 Distribution of interfacial normal stress (*z*) and maximum shear stress (b) for paths in honeycomb core and interfacial maximum shear stress (c) for paths in panel

与面板界面粘结起到分离作用。说明等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板一侧位置受压, 另一侧位置受拉。图4b中1a′、2a′、3a′与4a′对应图4a中1a、2a、3a与4a点位置最大剪切应力理论值的集中点, 蜂窝芯中路径Path2的图1a中*z*轴方向正应力集中点位置与其最大剪切应力理论值具有类似性质。说明等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板易于在受拉一侧的面板与蜂窝芯粘结界面边缘开始发生脱粘现象。图4c中1c、2c与3c对应面板中路径Path1最大剪切应力理论值的集中点, 图4c中面板路径Path1与图4a与b中蜂窝芯路径Path1具有对应关系。由图4a、b与c中路径Path1的应力值对比可见, 面板易于破坏位置出现在面板与蜂窝芯的无粘结界面位置。说明面板易于破坏位置与面板与蜂窝芯易于脱粘位置具有分离性。

图5给出了等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板的变形示意图, 图中的黑色方块代表面板与蜂窝芯粘结位置, 白色方块代表面板与蜂窝芯的无粘结界面位置。为了便于理解夹芯板变形过程, 假定夹芯板为塑性变形的材料。面板将先在A点位置发生屈服变

chinaXiv:202303.00214v1



ChinaXiv合作期刊

形。由于A点位置周围1、2与3位置面板与蜂窝芯很强结合力, 沿着向量 $\vec{AH}$ 、$\vec{AC}$ 与 $\vec{AG}$ 方向的变形抗力很强, 而沿着向量 $\vec{AI}$ 与 $\vec{AK}$ 方向的变形阻抗力小。因此, I与K点面板位置在沿着向量 $\vec{IA}$ 与 $\vec{KA}$ 方向的拉力的载荷作用下继A点面板位置屈服变形, 紧接着发生屈服变形, 形成沿着向量 $\vec{AE}$ 与 $\vec{AF}$ 方向的屈服变形第一阶段。随着面板沿着向量 $\vec{AE}$ 与 $\vec{AF}$ 方向屈服变形达到临界值(例如图5中B与D点), 夹芯板系统基于协调变形因素出现制衡面板沿着向量 $\vec{AE}$ 与 $\vec{AF}$ 方向继续屈服变形的新的屈服变形路径, 即面板沿着向量 $\vec{BH}$ 与 $\vec{DF}$ 方向屈服变形, 并伴随四边形ABCD区域被压实。因此, 夹芯板第二阶段屈服变形有三部分组成: 沿着向量 $\vec{AE}$ 与 $\vec{AF}$ 方向的屈服变形、沿着向量 $\vec{BH}$ 与 $\vec{DF}$ 方向的屈服变形与矩形ABCD区域被压实。将被压实矩形ABCD中四点合并为一点, 可见夹芯板的第二阶段屈服变形整体呈现X形状。夹芯板屈服变形第三阶段为整体被压实。

2.3 面板与蜂窝芯材料本体及结构参数对侧压夹芯板中面板折断的抗弯强度影响

图6a给出了蜂窝芯中Part1与Part3中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中 x 轴旋转对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度影响曲线; 图6b给出了蜂窝芯中Part1与Part3中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中 z 轴旋转对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹

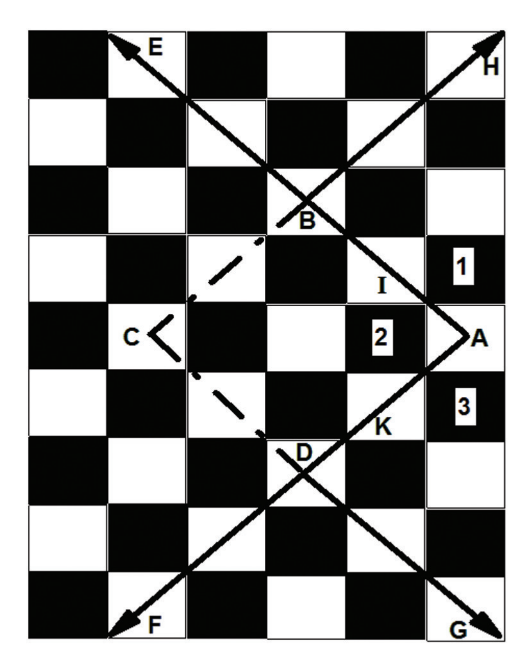


图5 等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板的变形示意图

Fig.5 Deformation schematic diagram of isosceles-trapezoid honeycomb core of glass steel sandwich panel

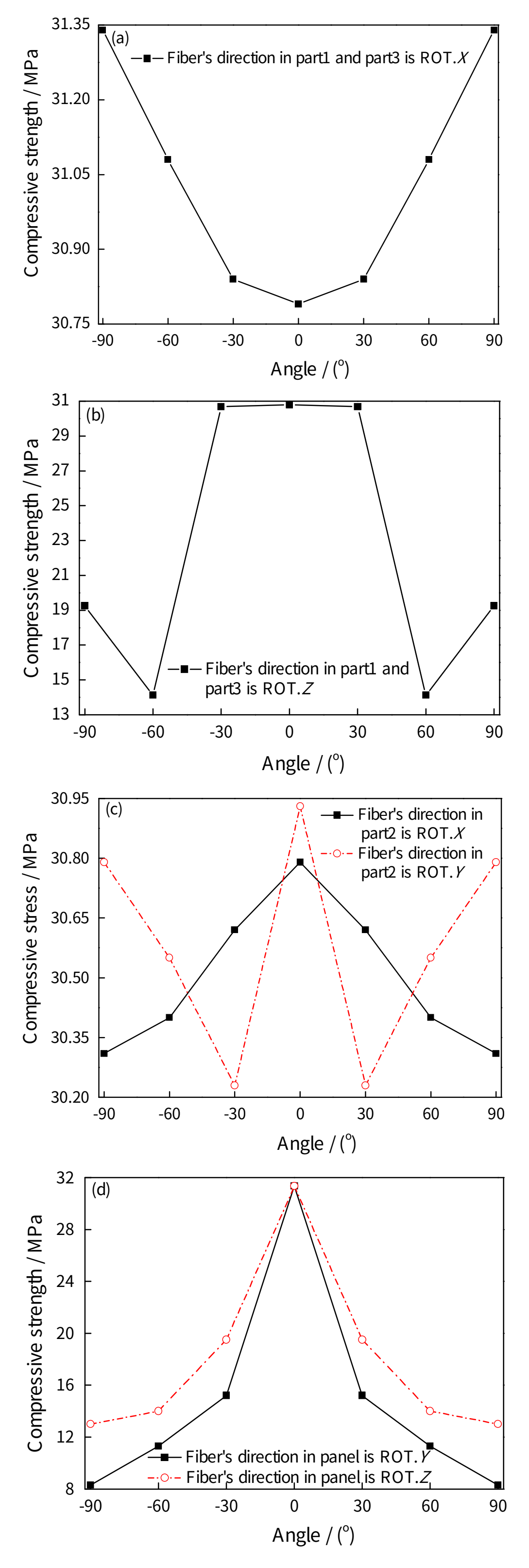
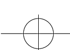


图6 蜂窝芯与面板中单向玻璃纤维排布方向对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度的影响

Fig.6 Compressive strength of broken panel in isosceles-trapezoid honeycomb core of glass steel sandwich panel is impacted by fiber's arrangement direction in honeycomb core and panel, (a) ROT.X in part1 and part3, (b) ROT.Z in part1 and part3, (c) ROT.X and ROT.Y in part2, (d) ROT.Y and ROT.Z in panel



chinaXiv:202303.00214v1

ChinaXiv合作期刊

芯板中面板折断抗压强度影响曲线; 图6c给出了蜂窝芯中Part2中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中x与y轴旋转对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度影响曲线。图6d给出了面板中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中y轴与z轴旋转对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度影响曲线。由图6a和b中的曲线可见, 随着蜂窝芯中Part1与Part3中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中x轴旋转角度增加夹芯板中面板折断的抗压强度增大, 随着蜂窝芯中Part1与Part3中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中z轴旋转角度增加夹芯板中面板折断的抗压强度先降低后增大, 并且对应0°的抗压强度明显大于对应±90°的抗压强度。这个结果说明, 蜂窝芯中的Part1和Part3主要承载沿着图1a中z轴与y轴方向载荷, 约束面板沿着图1a中z轴与y轴方向变形, 对面板起固支作用。由图6c中曲线可见, 随着蜂窝芯中Part2中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中x轴旋转角度增加夹芯板中面板折断的抗压强度先降低后增大, 且对应0°与±90°的抗压强度很接近; 随着蜂窝芯中Part2中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中y轴旋转角度的增加, 夹芯板中面板折断的抗压强度降低。这说明, 蜂窝芯中Part2主要承载沿着图1a中z轴与y轴方向载荷, 约束蜂窝芯中Part1与Part3沿着图1a中z轴与y轴方向位移, 对蜂窝芯中Part1与Part3起固支作用。由图6d中的曲线可见, 随着面板中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中y轴与z轴旋转角度增加夹芯板中面板折断抗压强度降低。这表明, 面板主要承载沿着图1a中x轴方向的载荷。蜂窝芯中Part1与Part3中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中z轴旋转对夹芯板中面板折断抗压强度峰值幅度影响的相对误差为-54.14%, 蜂窝芯中Part2中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中y轴旋转对夹芯板中面板折断抗压强度峰值幅度影响的相对误差为-1.16%, 面板中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中y轴旋转对夹芯板中面板折断抗压强度峰值幅度影响的相对误差为73.52%。这说明, 蜂窝芯中Part1、Part3与面板对夹芯板中面板折断抗压强度敏感度高, 其中蜂窝芯中Part1与Part3对夹芯板中面板折断抗压强度高敏感性出自其对面板沿着图1a中y轴方向变形约束因素, 而面板对夹芯板中面板折断抗压强度高敏感性出自其承载沿着图1a中x轴方向压缩载荷作用因素。蜂窝芯中Part1与Part3中单向玻璃纤维排布方向绕图1a中x轴旋转对夹芯板中面板折断抗压强度峰值幅度影响相对误差为1.77%。这个结果说明, 对于侧压等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板以面板折断破坏工况, 为了简化计算模型复杂长度, 可忽略蜂窝芯中单向玻璃纤维排布差异性, 只给定蜂窝芯的整体以Part2材料本体力学参数。综合分析图6a、b、c与d中曲线可得, 面板为侧压等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板主要承载构件, 蜂窝芯对面板起固支作用。

图7a给出了面板厚度对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度影响曲线; 图7b给出了蜂窝芯中Part2胞壁厚度t_t对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度影响曲线; 图7c给出了蜂窝芯中Part2高度h对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度影响曲线; 图7d给出了蜂窝芯横截面形状的等腰梯形上底边长a对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度影响曲线; 图6e给出了蜂窝芯横截面形状的等腰梯形高h_c对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度影响曲线。由图7a中的曲线可见, 随着面板厚度的增加夹芯板中面板折断抗压强度剧增。面板为侧压夹芯板主要承载构件, 随着面板厚度增加增加了面板承载横截面积, 加强了面板承载沿着图1a中x轴方向压力载荷能力。因此, 随着面板厚度的增加夹芯板中面板折断抗压强度剧增。由图7b中的曲线可见, 随着蜂窝芯中Part2胞壁厚度增加t_t增加夹芯板中面板折断的抗压强度微弱增加。随着蜂窝芯中Part2胞壁厚度t_t增加轻微地加强了蜂窝芯中Part2对Part1与Part3的固支作用, 继而轻微的增强了蜂窝芯对面板的固支作用。因此, 随着蜂窝芯中Part2胞壁厚度t_t的增加夹芯板中面板折断的抗压强度微弱增加。由图7c中的曲线可见, 随着蜂窝芯中Part2高度h增加夹芯板中面板折断抗压强度降低, 并且降低趋势逐渐减缓。蜂窝芯中的Part2承载沿着图1a中x轴方向载荷大小几乎为零值。随着蜂窝芯中Part2高度h增加夹芯板承载沿着图1a中x轴方向载荷能力几乎没有增加夹芯板承载横截面积又增加, 使夹芯板中面板折断抗压强度降低。同时, 随着蜂窝芯中Part2高度h的增加蜂窝芯对面板的固支作用加强, 增强了面板承载沿着图1a中x轴方向载荷能力, 制约了夹芯板中面板折断抗压强度降低趋势。因此, 随着蜂窝芯中Part2高度h的继续增加夹芯板中面板折断抗压强度降低趋势减缓。由图7d与e中的曲线看见, 随着蜂窝芯横截面形状的等腰梯形上底边长a与高h_c增加, 在其他条件一定的情况下蜂窝芯与面板接触面积减小, 使蜂窝芯对面板固支作用减弱。因此, 随着蜂窝芯横截面形状的等腰梯形上底边长a与高h_c的增加夹芯板中面板折断

chinaXiv:202303.00214v1

ChinaXiv合作期刊

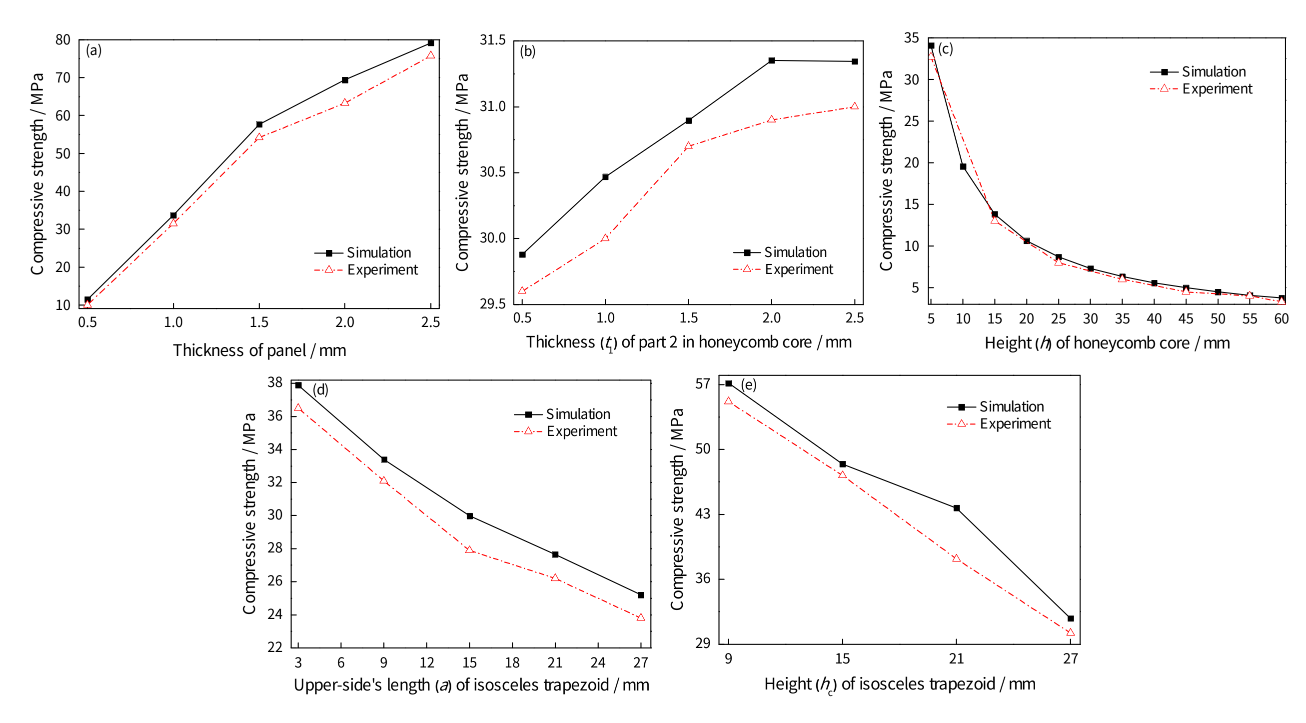


图 7　面板厚度、Part2 厚度 t_1、Part2 高度 h、蜂窝芯横截面形状的等腰梯形上底边长 a 与高 h_c 对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断抗压强度的影响

Fig.7 Effects of panel's thickness (a), Part2's thickness t_1 (b), Part2's height h (c), upper-side's length a (d) and height h_c (e) on Break a compressive strength of isosceles-trapezoid for honeycomb core's cross section shape

的抗压强度降低。

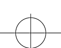
2.4 面板与蜂窝芯材料本体及结构参数对侧压夹芯板屈曲失稳的承载应力的影响

图 8a 给出了蜂窝芯中 Part1 与 Part3 中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 x 轴与 z 轴旋转对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳承载应力影响曲线; 图 8b 给出了蜂窝芯中 Part2 中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 x 轴与 y 轴旋转对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳承载应力影响曲线; 图 8c 给出了面板中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 y 轴与 z 轴旋转对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳承载应力影响曲线。

由图 8a 中曲线可见, 随着蜂窝芯中 Part1 与 Part3 中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 x 轴旋转角度的增大夹芯板屈曲失稳承载应力降低, 随着蜂窝芯中 Part1 与 Part3 中单向玻璃纤维绕图 1a 中 z 轴旋转角度的增大夹芯板屈曲失稳承载应力增大。这个结果说明, 蜂窝芯中 Part1 与 Part3 主要承载沿着图 1a 中 x 轴与 y 轴方向载荷。由图 7b 中的曲线可见, 随着蜂窝芯中 Part2 中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 x 轴旋转角度的增大夹芯板屈曲失稳承载应力降低, 随着蜂窝芯中 Part2 中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 y 轴旋转角度的增大夹芯板屈曲失稳承载应力先降低后增大, 并且±90°对应承载应力大于 0°对应承载应力。这表明, 蜂窝芯中 Part2 主要承载沿着图 1a 中 x 轴与 z 轴方向载荷。由图 7c 中的曲线可见, 随着面板中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 y 轴与 z 轴旋转角度的增大夹芯板屈曲失稳的承载应力降低。这表明, 面板主要承载沿着图 1a 中 x 轴方向载荷。蜂窝芯中 Part1 与 Part3 中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 z 轴旋转对夹芯板屈曲失稳的承载应力峰值幅度影响的相对误差为 18.70%, 蜂窝芯中 Part2 中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 y 轴旋转对夹芯板屈曲失稳的承载应力峰值幅度影响的相对误差为 2.79%, 面板中单向玻璃纤维排布方向绕图 1a 中 y 轴旋转对夹芯板屈曲失稳的承载应力峰值幅度影响的相对误差为−44.42%。这表明, 面板为等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳主要的承载构件, 蜂窝芯承载部分的压缩载荷, 蜂窝芯对面板主要起到固支作用, 蜂窝芯中 Part1 与 Part3 对面板沿着图 1a 中 y 轴方向的变形进行约束, 蜂窝芯中 Part2 主要对面板沿着图 1a 中 z 轴方向变形进行约束。

图 9a 给出了面板厚度对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳的承载应力影响曲线; 图 9b 给出了蜂窝芯中 Part2 胞壁厚度 t_1 对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳的承载应力影响曲线; 图 9c 给出了蜂窝芯中 Part2 高度 h 对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳的承载应力影响曲线; 图 9d 给出了

chinaXiv:202303.00214v1



ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.00214v1

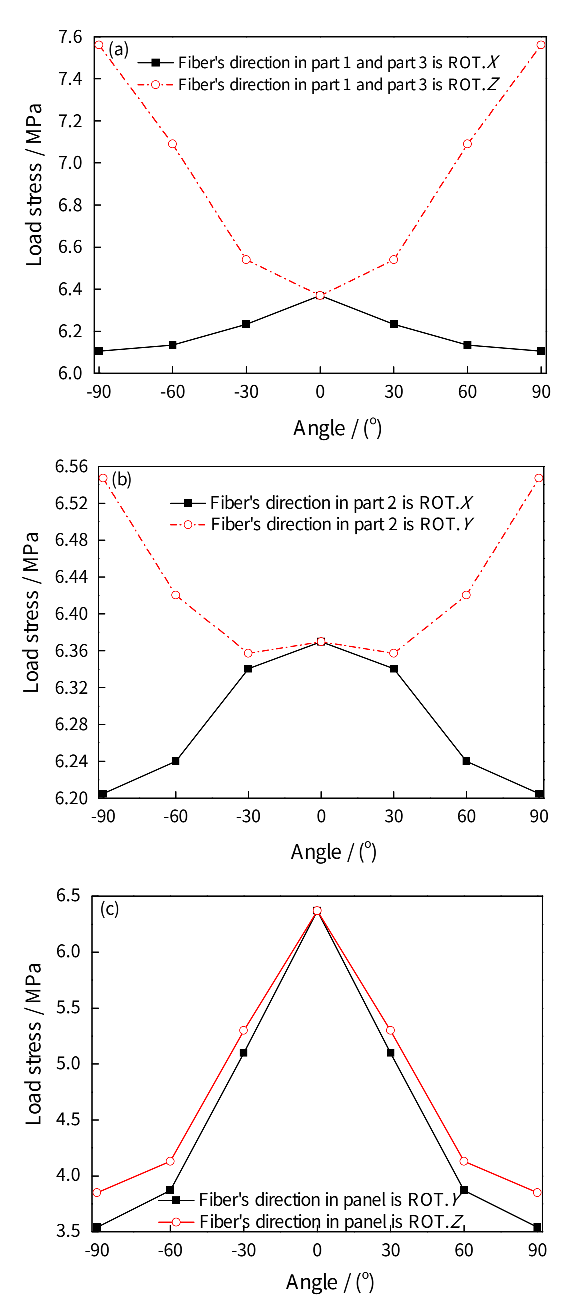


图8 蜂窝芯与面板中单向玻璃纤维排布方向对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳承载应力的影响

Fig.8 Compressive strength of buckling unstable isosceles trapezoid honeycomb core of glass steel sandwich panel is impacted by fiber's arrangement direction in honeycomb core and panel (a) ROT.*X* and ROT.*Z* in Part1 and Part3, (b) ROT.*X* and ROT.*Y* in Part2, (c) ROT.*Y* and ROT.*Z* in panel

蜂窝芯横截面形状的等腰梯形蜂窝芯上底边长 a 与高 h_c 对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳的承载应力影响曲线。

由图9a中的曲线可见，随着面板厚度的增加夹芯板屈曲失稳的承载应力增大。面板为夹芯板屈曲失稳的主要承载构件，随着面板厚度的增加面板承载面积增加，加强了面板承载沿着图1a中 x 轴方向载荷能力。因此，随着面板厚度的增加夹芯板屈曲

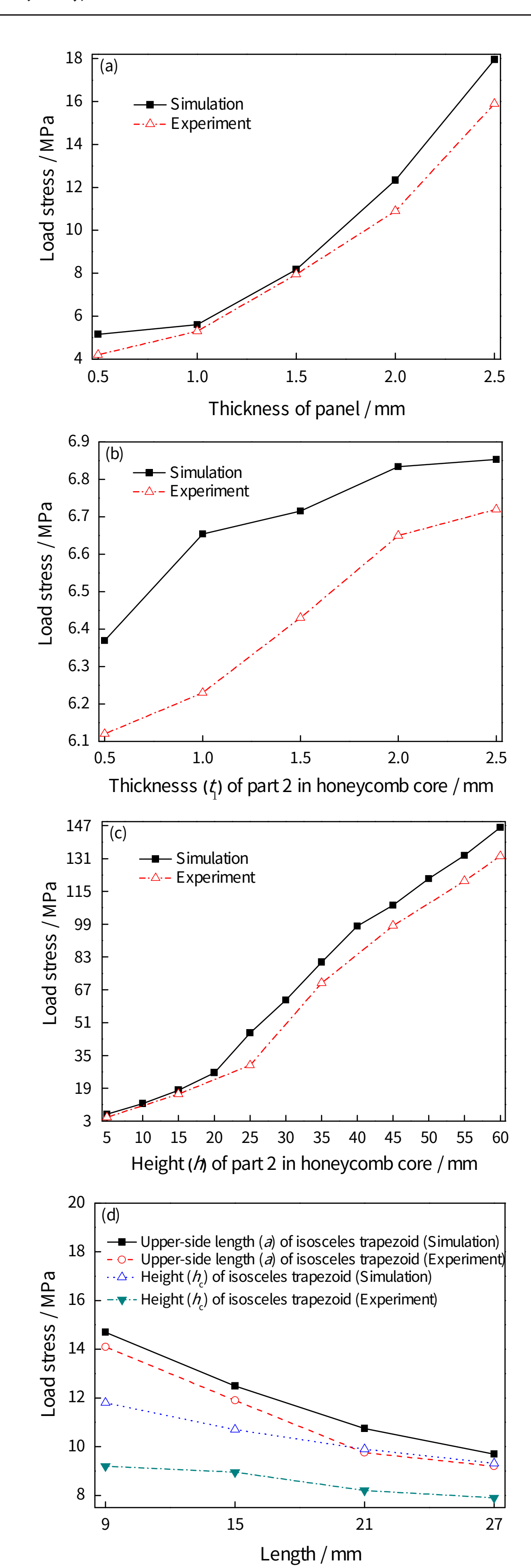


图9 面板厚度、Part2厚度 t_1、Part2高度 h、蜂窝芯横截面形状的等腰梯形上底边长 a 与高 h_c 对等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳承载应力的影响

Fig.9 Effects of panel's thickness (a)、Part2's thickness t_1 (b)、Part2's height h (c)、upper-side length a and height h_c (d) of isosceles-trapezoid for honeycomb core's cross section shape on buckling instability load stress

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.00214v1

失稳的承载应力增大。由图9b中的曲线可见, 随着蜂窝芯中Part2胞壁厚度t_1的增加夹芯板屈曲失稳的承载应力轻微增大。随着蜂窝芯中Part2胞壁厚度t_1的增加蜂窝芯中Part2承载沿着图1a中x轴方向载荷作用与蜂窝芯对面板沿着图1a中z轴方向的变形约束作用得到微弱的加强。因此, 随着蜂窝芯中Part2胞壁厚度的t_1增加夹芯板屈曲失稳的承载应力轻微增大。由图9c中的曲线可见, 随着蜂窝芯中Part2高度h的增加夹芯板屈曲失稳的承载应力显著增大。随着蜂窝芯中Part2高度h的增加蜂窝芯沿着图1a中z轴方向承载面积增加, 蜂窝芯中Part2承载沿着图1a中x轴方向载荷能力加强。同时, 随着蜂窝芯中Part2高度h的增加蜂窝芯对面板沿着图1a中z轴方向的变形约束作用加强, 面板稳定性与承载能力显著提高。因此, 随着蜂窝芯中Part2高度h的增加夹芯板屈曲失稳的承载应力显著增大。由图9d中的曲线可见, 随着蜂窝芯横截面形状的等腰梯形上底边长a与高h_c的增加夹芯板屈曲失稳的承载应力增大。当其他条件一定时, 随着蜂窝芯横截面形状的等腰梯形上底边长a与高h_c的增加沿着图1a中x轴方向的蜂窝芯与面板接触面积减少, 使蜂窝芯承载沿着图1a中x轴方向载荷能力与蜂窝芯对面板固支作用减弱。因此, 随着蜂窝芯横截面形状的等腰梯形上底边长a与高h_c的增加夹芯板屈曲失稳的承载应力降低。

3 结 论

1. 侧压等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板的破坏方式主要有面板折断、夹芯板屈曲失稳及面板和蜂窝芯脱粘, 面板的易于破坏位置与面板与蜂窝芯易于脱粘位置具有分离性。

2. 面板是侧压等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断工况的承载构件, 蜂窝芯承载压缩载荷的作用几乎为零, 蜂窝芯对面板起固支作用; 面板是等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板屈曲失稳工况的主要承载构件, 蜂窝芯承载部分压缩载荷, 蜂窝芯对面板主要起固支作用。

3. 对于侧压等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板中面板折断工况, 为了简化有限元模型计算的复杂程度, 可以只给定蜂窝芯的整体以Part2材料本体力学参数。

参 考 文 献

1 DU Shanyi, Advanced composite materials and aerospace engineering, Acta Materiae Compositae Sinica CS, **24**(1), 1(2007)
(杜善义, 先进复合材料与航空航天, 复合材料学报, **24**(1), 1(2007))

2 Zabihpoor M, Adibnazari S. Mechanisms of fatigue damage in foam core sandwich composites with unsymmetrical carbon/glass face sheets, Journal of Reinforced Plastics and Composites, **26**(17), 1831(2007)

3 Vaidya U K, Pillay S, Impact and post impact vibration response of protection metal foam composite sandwich plates, Materials Science and Engineering A, **428**(1), 59(2006)

4 Nemat-Nasser S, Kang W J, McGee J D, Experimental investigation of energy absorption characteristics of component of sandwich structures, International Journal of Impact Engineering, **34**(6), 1119 (2007)

5 SUN Zhi, SHI Shanshan, SUN Shiyong, Compression performance and interfacial properties of carbon fiber- foam metal sandwich beams with aramid fiber toughening, Acta Materiae Compositae Sinica , **31**(6), 1497(2014)
(孙 直, 石珊珊, 孙士勇, 芳纶纤维增韧碳纤维泡沫金属夹芯梁压缩性能及界面性能, 复合材料学报, **31**(6), 1497(2014))

6 Wang C, Chen H R, Lei Z K, Experimental investigation of interfacial fracture behavior in foam core sandwich beams with visco-elastic adhesive interface, Composite Structure, **92**(5), 1085(2010)

7 Sun Z, Jeyaraman J, Sun S Y, Carbon- fiber aluminum foam sandwich with short aramid- fiber interfacial toughening, Applied Science and Manufacturing, 2012, **43**(11), 2059(2012)

8 Sun S Y, Chen H R, The interfacial fracture behavior of foam core composite sandwich structures by a viscoelastic cohesive model, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, **54**(8), 1481(2011)

9 YAN Guang, HAN Xiaojin, YAN Chuliang, Bucking analysis of composite cylindrical shell under axial compression load, Acta Materiae Compositae Sinica , **31**(3), 781(2014)
(闫 光, 韩小进, 阎楚良, 复合材料圆柱壳轴压屈曲性能分析, 复合材料学报, **31**(3), 781(2014))

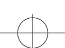
10 YANG Yanzhi, ZHENG Quan, LI Hao, Numerical simulation and test on stability of composite grid stiffened cylinder, Acta Materiae Compositae Sinica , **2**(1), 295(2015)
(杨颜志, 郑 权, 李 昊, 复合材料格栅圆柱筒稳定性数值仿真与试验, 复合材料学报, **32**(1), 295(2015))

11 JIN Yu'an, GUO Shiju, LI Zhijun, In-plane compressive properties of mild steel honeycomb sandwich, Materials for Mechanical Engineering, **31**(8), 19(2007)
(井玉安, 果世驹, 李志军, 刚蜂窝夹芯板面内压缩性能, 机械工程材料, **31**(8), 19(2007))

12 Karagiozova D, Yu T X, Plastic deformation models of regular hexagonal honeycomb under in-plane biaxial compression, International Journal of Mechanical Science, **46**(10), 1489(2004)

13 Wang A J, McDowell D L, In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs, Journal of Engineering Materials and Technolog, **126**(2), 137(2004)

14 TIAN Aiping, YU Wei, LI Dongjie, Compressive and flexural mechanical properties of foam Al-HGM/epoxy foam composites, Acta Materiae Compositae Sinica , 2013, **30**(4), 74(2013)
(田爱平, 余 为, 李东杰, 泡沫铝-空心玻璃微珠/环氧泡沫复合材料压缩及弯曲力学性能, 复合材料学报, **30**(4), 74(2013))



ChinaXiv合作期刊

15 Ting-Chun Lin, Ting-Jung Chen, Jong-Shin Huang, In-plane elastic constants and strengths of circular cell honeycomb, Composites and Science and Technology, **72**(4), 1380(2012)

16 Tantikom K, Aizawa T, Mukai T, Symmetric and asymmetric deformation transition in the regularly cell structure materials, International Journal of Solid and Structure, **45**(12), 2512(2008)

17 Zhang W H, Sun S P, Scale-related topology optimization of cellular materials and structures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, **68**(3), 993(2006)

18 ZHENG Jiliang, Sun yong, PENG Mingjun, Mechanical properties of composite material based on fiber pull-out theory, Ordance Material Science And Engineering, **37**(2), 16(2014)
(郑吉良, 孙 勇, 彭明军, 基于纤维拔出理论的复合材料力学性能的研究, 兵器材料科学与工程, **37**(2), 16(2014))

欢迎订阅2016年《金属学报》

《金属学报》创刊于1956年, 是由中国金属学会主办、中国科学院金属研究所承办的材料冶金领域的学术性期刊, 是我国材料冶金领域创刊最早的期刊之一, 刊登冶金科技和材料科学与工程方面具有创新性、高水平和有重要意义的原始学术论文以及反映学科发展状况的综述和信息性文章。《金属学报》被SCI, EI, CA, SA, JICST和AJ等国际六大检索系统全部收录。

《金属学报》2013年入选国家新闻出版广电总局"百强科技期刊"称号; 2012年荣获"中国最具国际影响力学术期刊"称号; 2009年荣获"新中国60年有影响力的期刊"称号; 2008年荣获首届出版政府奖(出版单位奖), 是唯一获奖的科技期刊编辑部。囊括了历届国家最高级的期刊奖励。

欢迎广大从事金属及相关材料的基础研究和应用研究的科研人员、从事材料工程设计与制造的工程技术人员、高等院校和科研院所的师生和领导订阅。

《金属学报》为月刊, 国内定价: 128元/本, 全年1536元。 邮发代号: 2-361。 请您在邮局《全国报刊目录》中查找, 在邮局未订到者, 可与编辑部联系补订, 订单函索即寄。 电汇或从邮局汇款给编辑部即可。 订阅联系人: 万向英, 电话: 024-83978465; E-mail: xywan@imr.ac.cn; QQ: 1561303653。

邮寄付款方式:

地 址: 沈阳市文化路72号中国科学院金属研究所《金属学报》

联系人: 黄 磊(收) 邮 编: 110016 注 明:《金属学报》订刊

转账付款方式:

银行户名: 中国科学院金属研究所

开户银行: 中国工商银行沈阳大南分理处

帐 号: 33010073092640030-79 注 明:《金属学报》订刊

热忱欢迎国内外专家、学者订阅!

欢迎订阅2016年《材料科学技术(英文版)》

Journal of Materials Science & Technology, 简称JMST, 中文刊名为《材料科学技术(英文版)》, 是中国材料领域第一本英文学术期刊, 由中国科学技术协会主管, 中国金属学会、中国材料研究学会和中国科学院金属研究所联合主办, 与Elsevier出版公司合作出版。

该刊主要刊登国内外材料和冶金领域原创性的研究论文、综合评述以及新技术, 内容覆盖金属材料、无机非金属材料、高分子材料以及复合材料。 JMST目前被科学引文索引(SCI)、工程索引(EI)、化学文摘(CA)、科学文摘(SA)、俄罗斯文摘(AJ)等国际著名检索系统收录, 同时作为核心期刊, 入选了国内各大数据库和检索系统。

该刊最新SCI影响因子为1.909, 位居SCI期刊排名冶金类Q1区和材料综合类Q2区。 JMST是国内材料和冶金领域最高水平的学术期刊之一, 适于国内外科研、教学、工程技术人员阅读参考。

《材料科学技术(英文版)》为月刊, 国内定价: 150元/本, 全年1800元。 本刊2016年发行方式为自办发行。 订阅联系人: 万向英, 电话: 024-83978465; E-mail: xywan@imr.ac.cn; QQ: 1561303653。

邮寄付款方式:

地 址: 沈阳市文化路72号中科院金属所《材料科学技术(英文版)》

联系人: 黄 磊(收) 邮 编: 110016 注 明: 汇款用途

转账付款方式:

银行户名: 中国科学院金属研究所

开户银行: 中国工商银行沈阳大南分理处

帐 号: 33010073092640030-79 注 明: 汇款用途

热忱欢迎国内外专家、学者订阅!

chinaXiv:202303.00214v1

